

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.03.031

CSTR:32310.14.stbxb.2026.03.031

韩固, 马兰兰, 苗芳芳, 等. 不同降水年型下休闲期耕作覆盖措施对马铃薯水分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(3): 367-379.

HAN Gu, MA Lanlan, MIAO Fangfang, et al. Effect of tillage with mulching during fallow period on water use of potato under different precipitation year types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 367-379.

## 不同降水年型下休闲期耕作覆盖措施对 马铃薯水分利用的影响

韩固<sup>1,2</sup>, 马兰兰<sup>1</sup>, 苗芳芳<sup>1</sup>, 勉有明<sup>3</sup>, 段瑞兵<sup>2</sup>, 高君亮<sup>2</sup>, 侯贤清<sup>1</sup>, 李荣<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心 内蒙古磴口荒漠生态系统  
定位观测研究站, 内蒙古 巴彦淖尔 015200; 3. 宁夏农林科学院固原分院, 宁夏 固原 756000)

**摘要:** [目的] 为探究不同降水年型下耕作覆盖对土壤水分动态变化的影响机制, 促进马铃薯水分高效利用。[方法] 于2018—2021年连续3 a在宁夏南部旱作区开展不同耕作深度(翻耕15 cm、深松耕30 cm、深松耕40 cm、深松耕50 cm)结合覆盖(燕麦秸秆、塑料地膜、不覆盖)大田定位试验研究。[结果] 耕作、覆盖材料对丰水年和平水年休闲末期土壤蓄水量和蓄水效率均有极显著影响, 耕作深度对枯水年蓄水效率有极显著影响, 覆盖材料对平水年和枯水年休闲初期土壤蓄水量有显著影响, 二者交互对平水年蓄水效率影响极显著。丰水年, 深松耕30 cm覆塑料地膜休闲期土壤蓄水量和蓄水效率较高, 而平水和枯水年以深松耕40 cm覆燕麦秸秆处理土壤蓄水效果最佳。不同降水年型下耕作覆盖可显著提高0~100 cm层土壤含水量, 同一耕作深度下, 不同降水年型以覆燕麦秸秆和塑料地膜处理土壤含水量提高最显著, 同一覆盖材料下以深松30、40 cm较佳。丰水年, 深松耕30 cm覆燕麦秸秆处理在90~120 d对耕层(0~40 cm)保水效果最佳; 平水和枯水年, 深松耕40 cm覆燕麦秸秆处理在各关键时期对0~100 cm土层整体含水量提升最明显。3 a均以耕作深度覆燕麦秸秆处理提高马铃薯生育期和年降水利用效率效果最佳, 丰水、平水和枯水年均以深松耕30 cm和深松耕40 cm覆燕麦秸秆处理效果最佳。耕作、覆盖对不同降水年型下作物水分利用效率均有显著影响, 而二者交互对平水年影响显著。丰水年作物水分利用效率均以深松耕30 cm覆燕麦秸秆最高, 较翻耕不覆盖显著提高71.02%, 平水和枯水年以深松耕40 cm覆燕麦秸秆最高, 分别较翻耕不覆盖显著提高51.99%和111.00%。通过对耕作深度与水分利用效率关系拟合发现, 丰水年耕作深度在30~35 cm时, 作物水分利用效率和降水利用效率较高, 而平水和枯水年耕作深度在35~40 cm时较高。[结论] 耕作深度结合覆盖可有效改善休闲期和生育期土壤水分状况, 实现马铃薯对水分的高效利用, 建议在宁南旱区丰水年采用深松耕30~35 cm覆燕麦秸秆处理、平水和枯水年采用深松耕35~40 cm覆燕麦秸秆处理效果最佳。

**关键词:** 降水年型; 耕作深度; 降水利用效率; 覆盖措施

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0367-13

## Effect of Tillage with Mulching During Fallow Period on Water Use of Potato under Different Precipitation Year Types

HAN Gu<sup>1,2</sup>, MA Lanlan<sup>1</sup>, MIAO Fangfang<sup>1</sup>, MIAN Youming<sup>3</sup>,

DUAN Ruibing<sup>2</sup>, GAO Junliang<sup>2</sup>, HOU Xianqing<sup>1</sup>, LI Rong<sup>1</sup>

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem Observation Research Station, Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Bayannaer, Inner Mongolia 015200, China; 3. Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Guyuan, Ningxia 756000, China)

收稿日期: 2025-12-19

修回日期: 2026-01-20

录用日期: 2026-02-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(32160515, 31860362); 宁夏自然科学基金项目(2025AAC030184, 2025AAC030238); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2022MS03070)

第一作者: 韩固(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱地保护性耕作技术研究。E-mail: hg1765883646@163.com

通信作者: 李荣(1984—), 女, 博士, 教授, 主要从事旱作农业节水技术研究。E-mail: lirong\_mail@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

**Abstract:** [Objective] To explore the mechanism underlying the effects of tillage and mulching on the dynamic changes in soil water content under different precipitation year types and promote the efficient water utilization of potato. [Methods] From 2018 to 2021, a three-year field experiment was conducted in the dryland area of southern Ningxia, involving different tillage depths (plowing at 15 cm, subsoiling at 30, 40, and 50 cm) combined with mulching (oat straw, plastic film, and no mulching). [Results] Tillage and mulching had highly significant effects on soil water storage and water storage efficiency at the end of the fallow period in both wet and normal years. Tillage depth exerted a highly significant influence on water storage efficiency in dry years. Mulching materials significantly affected the soil water storage at the beginning of the fallow period in normal and dry years. The interaction between tillage and mulching had a highly significant effect on water storage efficiency in normal years. In wet years, subsoiling at 30 cm combined with plastic film mulching during the fallow period resulted in higher soil water storage and water storage efficiency. In contrast, under normal and dry year conditions, subsoiling at 40 cm with oat straw mulching achieved the optimal soil water storage efficiency. Tillage combined with mulching significantly elevated soil water content in the 0–100 cm soil layer under different precipitation year types. At a consistent tillage depth, oat straw mulching and plastic film mulching exhibited the optimal performance in enhancing soil water content across various precipitation year types. For the same mulching material, subsoiling at 30 and 40 cm produced preferable effects. In wet years, the treatment of subsoiling to 30 cm and covering with oat straw had the best water retention effect in the deep layer (0–40 cm) during the period of 90–120 days. In normal and dry years, the treatment of subsoiling to 40 cm and covering with oat straw had the most significant effect on increasing the overall soil moisture content in the 0–100 cm layer at all critical periods. Over the three-year experimental period, oat straw mulching combined with tillage depth achieved the optimal effects in improving the water use efficiency (WUE) of potato during its growing season and the annual precipitation use efficiency (PUE). Specifically, in the wet, normal rainfall and dry years, the treatments of 30 cm and 40 cm subsoiling combined with oat straw mulching consistently presented the best performance in this regard. Tillage and mulching both exerted a significant effect on crop water use efficiency (WUE) under different precipitation year types, while their interaction effect was only significant in the normal rainfall year. In the wet year, the highest crop WUE was obtained under 30 cm subsoiling combined with oat straw mulching, which was a significant increase of 71.02% compared with conventional tillage without mulching. In the normal rainfall and dry years, the maximum crop WUE was achieved under 40 cm subsoiling combined with oat straw mulching, with a significant increase of 51.99% and 111.00%, respectively, relative to conventional tillage without mulching. Fitting analysis of the relationship between tillage depth and water use efficiency revealed that crop water use efficiency (WUE) and precipitation use efficiency (PUE) were relatively high at a tillage depth of 30–35 cm in the wet year, whereas they peaked at a tillage depth of 35–40 cm in both the normal rainfall and dry years. [Conclusion] The combination of tillage depth and mulching can effectively improve the soil moisture status during both the fallow period and growing season, thereby enabling the efficient water utilization of potato. It is therefore recommended that in the dry farming region of southern Ningxia, the treatment of 30–35 cm subsoiling combined with oat straw mulching be adopted for wet years, while 35–40 cm subsoiling combined with oat straw mulching is optimal for both normal rainfall and dry years.

**Keywords:** precipitation year types; tillage depth; precipitation use efficiency; mulching treatments

**Received:** 2025-12-19

**Revised:** 2026-01-20

**Accepted:** 2026-02-01

**Online**(www.cnki.net): 2026-03-25

宁夏南部旱作区(简称“宁南旱区”),是马铃薯重要的生产基地,素有“马铃薯之乡”的称号<sup>[1]</sup>。该区农业生产高度依赖自然降水,但降水总量匮乏且时

空分布不均,加之强烈的水分蒸发,致使土壤蓄水保墒能力较弱,制约旱作区作物生长及产量的提高<sup>[2]</sup>。由于长期沿用传统耕作模式,该区耕层土壤结构遭

受严重破坏。同时,作物秸秆多采用田间焚烧或直接清除的处理方式,导致地表大面积裸露,加剧水热资源的流失,进而影响马铃薯产业的可持续发展<sup>[3-4]</sup>。因此,在充分利用有限降水的前提下,采取有效的耕作覆盖措施来降低传统耕作造成的不利影响,是提高宁南旱区马铃薯水分高效利用的关键。宁南旱区的降水具有高度的波动性和不稳定性,年际和年内降水分布不均,导致降水年型不同,作物产量大幅波动<sup>[5]</sup>。而保护性耕作可优化土壤耕层构造,提升土壤对水分的渗透性能,从而达到作物提质增效的目的<sup>[6]</sup>。在不同降水年型下,作物水分利用效率因耕作方式和覆盖材料的不同而有所差异<sup>[7]</sup>,张凯等<sup>[8]</sup>研究表明,深松耕40 cm可提高冬小麦生育期0~100 cm层土壤水分含量,有利于籽粒灌浆,提高水分利用效率。深旋松耕40 cm能够显著增强土壤供水能力,促进作物耗水,减少干旱胁迫危害,提高马铃薯水分利用效率,尤其以干旱年份效果最好,其次是平水年<sup>[9]</sup>。休闲期深翻、深松耕作能够有效改善土壤结构,使土壤更易吸纳自然降水,通过增强蓄水保墒能力,进而实现作物增产。此耕作方式不仅可显著提升作物水分利用效率,还能充分发挥降水的资源效益,让有限降水得到更高效利用,在枯水和平水年份,休闲期深翻25~30 cm效果更好,在丰水年份,休闲期深松30~40 cm效果较好<sup>[10]</sup>。覆盖材料可以调控土壤水温状况,有利于作物生长<sup>[11]</sup>。休闲期覆盖塑料地膜可显著提高不同降水年型下小麦水分利用效率<sup>[12]</sup>,而秸秆覆盖可改善土壤肥力<sup>[13]</sup>。在研究干旱地区耕作深度或覆盖措施对土壤水分利用的影响时,还需综合考虑耕作深度与覆盖措施间的协同效应,结合干旱地区不同降水年型下的气候特征与环境变化,探究适配作物生长需求的高效耕作覆盖模式,以实现水分资源的优化利用<sup>[14]</sup>。已有研究<sup>[15-16]</sup>发现,深松30~35 cm覆秸秆能够显著改善土壤水分条件,通过提升作物休闲期与关键生育期的土壤含水量,增强作物对水分的利用,从而实现作物增产,尤其在平水年和枯水年效果更好<sup>[17]</sup>。目前有关不同降水年型下保护性耕作对土壤水分提高方面已有不少研究。然而,在宁南旱区开展不同降水年型下耕作深度结合覆盖材料对土壤水、降水和作物水协同高效利用方面的研究尚鲜见报道。本研究连续3 a在宁南旱作区秋作物收获后开展不同耕作深度结合覆盖材料大田定位试验研究,分析不同降水年型下耕作覆盖对土壤水分变化特征、降水利用效率及作物水分利用效率的影响,旨在为该区马铃薯实现高产栽培与水分高效利用提供一定的理论基础与技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

本研究于2018—2021年在宁夏海原县树台乡大坝台村马铃薯种植基地(36°06'N,105°31'E)开展。该基地位于宁夏南部旱作区,农业生产完全依赖自然降水,年降水量350~450 mm,降水主要集中在7—9月,年平均气温7.9℃,属雨养旱作区。试验期间各月降水量见图1。本试验期间降水年型划分标准依据国内通用标准<sup>[18]</sup>,基于多年平均降水量( $P$ , mm)、逐年降水量( $P_i$ , mm)和均方差( $W$ )。丰水年:当某年的降水量( $P_i$ )大于多年平均降水量( $P$ )加上均方差( $W$ )的0.33倍,即 $P_i > P + 0.33W$ ;枯水年:当某年的降水量( $P_i$ )小于多年平均降水量( $P$ )减去均方差( $W$ )的0.33倍,即 $P_i < P - 0.33W$ 。依据划分标准,试验期间2018—2019年(当年10月至翌年9月)、2019—2020年、2020—2021年分别为丰水(521.3 mm)、平水(376.2 mm)和枯水年(294.5 mm),生育期降水量分别为450.5、292.8、229.3 mm,休闲期降水量分别为70.8、83.4、65.2 mm,多年平均降水量为2006—2021年的降水量(410.3 mm)。试验前0~60 cm层平均土壤体积质量为1.34 g/cm<sup>3</sup>,土壤有机质质量分数为12.58 g/kg,全氮质量分数为0.81 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾质量分数分别为53.22、11.13、166.39 mg/kg,土壤肥力属于低等水平。

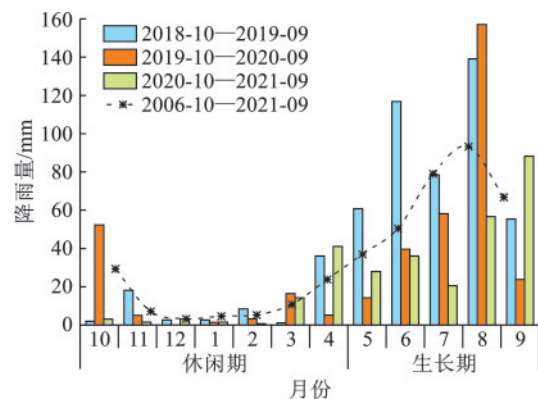


图1 试验期间月降水量及多年平均月降水量

Fig.1 Monthly precipitation and long-term average monthly precipitation during experimental period

### 1.2 试验设计

试验采用双因素裂区试验设计,主处理设置4种不同耕作深度:翻耕15 cm处理( $P_{15}$ )、深松耕30 cm处理( $S_{30}$ )、深松耕40 cm处理( $S_{40}$ )和深松耕50 cm处理( $S_{50}$ );副处理设置3种覆盖方式,分别为普通黑色聚乙烯塑料地膜覆盖(DM)、燕麦秸秆覆盖(JM)及不覆盖(BM),以翻耕15 cm不覆盖处理作为对照,共12

个试验处理组合,各 3 次重复,小区面积  $32\text{ m}^2(8\text{ m}\times 4\text{ m})$ ,小区随机排列。设 1 m 宽保护行,防止水分相互影响。

耕作处理:深松耕和翻耕均于 2018 年、2019 年、2020 年 10 月前茬作物收获后进行,深松耕采用深松机(IS-230)进行,耕作深度分别为 30、40、50 cm,翻耕采用铧犁拖拉机,深度为 15 cm,耕后耙耱,覆盖不同材料进行休闲;各处理均于翌年 4 月中下旬穴播马铃薯。覆盖处理:燕麦秸秆采用整秆覆盖,厚度为 3~5 cm;聚乙烯黑膜宽为 1.0 m,厚为 0.008 mm。

供试马铃薯品种为“青薯 9 号”,分别于 2019 年 4 月 20 日、2020 年 4 月 24 日、2021 年 5 月 1 日播种,分别于 2019 年 10 月 12 日、2020 年 10 月 15 日和 2021 年 11 月 5 日收获。前茬作物为玉米,采用传统翻耕方式。种植方式为平作穴播,种植深度 10~15 cm,穴深 15 cm,播后覆土 5 cm,宽窄行种植,宽行距 60 cm,窄行距 40 cm,株距 40 cm,密度为 5 万株/ $\text{hm}^2$ 。秋耕时施纯氮、纯磷和纯钾分别为 225、90、120  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,开花期追施纯氮 67.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。试验期间进行人工除草,不进行灌溉。

### 1.3 测定项目及方法

分别在马铃薯播后 0、30、60、90、120、150 d,采用土钻取土烘干法测定 0~100 cm 层土壤质量含水量(%),每层 20 cm 进行取样。

$$\text{土壤蓄水量}^{[2]}: \text{WS} = W_i \times V_i \times h \times 10$$

式中:WS 为土壤蓄水量,mm; $i$  为土层深度,cm; $W$  为土壤质量含水量,%; $V$  为土壤体积质量, $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $h$  为各土层的厚度;cm。

$$\text{土壤蓄水效率}^{[19]}: \text{PR} = \text{WS}_i / P_0$$

式中:PR 为土壤蓄水效率,%; $\text{WS}_i$  为休闲末期与休闲初期土壤蓄水量之差,mm; $P_0$  为休闲期降水量,mm。

$$\text{作物耗水量}^{[20]}: \text{ET} = \Delta W + I + P - D - R$$

式中:ET 为作物耗水量,mm; $\Delta W$  为生育阶段土壤蓄水量变化量,mm; $I$  为灌溉量,mm; $P$  为作物生育期  $\geq 5$  mm 降雨量,mm; $D$  为灌溉后土壤水向下层流动量,mm; $R$  为地表径流,mm。

本试验地无灌溉,无地表径流产生,且地下水位较深( $>50$  m),因此, $I$ 、 $D$  和  $R$  可忽略不计。可简写为:

$$\text{ET} = \Delta W + P$$

$$\text{作物水分利用效率}^{[21]}: \text{WUE} = Y / \text{ET}$$

式中:WUE 为作物水分利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ; $Y$  为产量, $\text{kg}/\text{hm}^2$ ; $\text{ET}$  为耗水量,mm。

$$\text{降水利用效率}^{[10]}: \text{PUE}_1 = Y / (P_a + P_0)$$

$$\text{PUE}_2 = Y / P_a$$

式中: $\text{PUE}_1$  为年降水利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ; $\text{PUE}_2$  为生育期降水利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ; $Y$  为作物产量, $\text{kg}/\text{hm}^2$ ; $P_a$  为生育期降水量,mm; $P_0$  为休闲期降水量,mm。

克里格插值(Kriging)方法的选用原因:因其可一体化完成土壤属性数据预处理、变异函数拟合、插值计算及可视化绘图,内置的球状等变异函数模型与多种克里格插值类型能精准适配旱作区不同耕作措施下土壤属性的空间变异特征。插值参数设置:主要等值线的间隔为 3。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2019 软件进行数据整理。采用 DPS 15.1 软件进行双因素裂区方差分析,结合最小显著差异法(LSD)进行显著性分析( $\alpha=0.05$ )。使用 Surfer 15 和 Origin Pro 2024b 软件绘图。图表中数据为平均值  $\pm$  标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕作覆盖对土壤水分及利用状况的影响

2.1.1 休闲期土壤水分 由表 1 可知,耕作深度、覆盖材料对丰水和平水年休闲末期土壤蓄水量和蓄水效率、耕作深度对枯水年蓄水效率有极显著影响,覆盖材料对平水和枯水年休闲初期土壤蓄水量有显著影响,耕作与覆盖的交互作用对平水年蓄水效率影响极显著。休闲初期,丰水年 0~100 cm 层土壤蓄水量均为 315.78 mm;同一覆盖材料下,平水年各处理差异不显著,枯水年以  $S_{40}$  处理保水效果较好,各处理差异不显著;3 种覆盖材料下,平水年和枯水年分别以 DM 和 JM 处理土壤蓄水量较高,较 BM 处理分别提高 6.64% 和 5.43%;二者交互,平水和枯水年分别以  $S_{40} \times \text{DM}$  和  $S_{40} \times \text{JM}$  处理表现更优,较  $P_{15} \times \text{BM}$  处理分别提高 8.30% 和 12.88%。休闲末期,同一覆盖材料下,丰水年和平水年各处理无显著差异,枯水年以  $S_{40}$  处理表现最佳,较  $P_{15}$  处理提高 5.74%,3 种覆盖材料下,丰水年以 DM 和 JM 处理较 BM 处理分别提高 11.13% 和 9.64%,平水和枯水年均以 JM 处理保水效果最优,平均较  $P_{15}$  处理显著提高 12.39%;耕作与覆盖交互,在丰水年以  $S_{30} \times \text{DM}$  处理表现最佳,较  $P_{15} \times \text{BM}$  处理显著提高 16.88%。平水和枯水年均以  $S_{40} \times \text{JM}$  处理较佳,平均较  $P_{15} \times \text{BM}$  处理显著提高 24.64%。说明深松 30~40 cm 覆燕麦秸秆或塑料地膜可显著提高休闲期土壤蓄水量,丰水年以深松耕 30 cm 覆塑料地膜处理较好,而平水年和枯水年以深松耕 40 cm 覆燕麦秸秆处理效果最佳。

表 1 不同降水年型休闲期耕作覆盖对土壤水分的影响  
Table 1 Effects of tillage with mulching on soil moisture during fallow period under different precipitation year types

耕作深度	覆盖材料	丰水年						平水年						枯水年					
		休闲期土壤蓄水量 (WS)/mm		蓄水效率 (PR)/%	休闲期土壤蓄水量 (WS)/mm		蓄水效率 (PR)/%	休闲期土壤蓄水量 (WS)/mm		蓄水效率 (PR)/%	休闲期土壤蓄水量 (WS)/mm		蓄水效率 (PR)/%	休闲期土壤蓄水量 (WS)/mm		蓄水效率 (PR)/%			
		初期	末期		初期	末期		初期	末期		初期	末期		初期	末期				
P <sub>15</sub>	DM	377.86±4.51a	87.68±7.81a	304.76±8.99a	348.48±6.24b	54.42±7.53b	287.73±11.21a	298.38±14.56a	15.08±2.84b	315.78a	373.87±4.64a	82.05±8.02a	297.74±9.47a	380.55±2.86a	99.30±7.76a	294.42±9.87a	307.01±13.43a	17.83±3.38b	
	JM	336.26±2.67b	28.93±4.62b	286.07±15.41a	311.76±5.84c	30.81±6.51c	273.63±6.74b	294.51±10.94a	29.58±3.60a	BM	393.02±4.17a	109.10±7.21a	308.29±12.03a	356.26±3.43b	57.51±6.52b	290.55±8.16cb	312.35±6.35a	30.87±4.74a	
	DM	385.73±4.79a	98.80±8.28a	298.68±10.81b	410.97±8.09a	134.64±5.17a	305.06±7.15a	324.08±8.07a	26.94±2.86a	JM	351.30±5.37b	50.16±1.46b	288.68±15.73b	340.01±8.48c	61.54±6.71b	296.11a±5.01b	301.85±17.27a	8.14±2.39b	
S <sub>30</sub>	DM	381.00±5.15a	92.12±8.90a	309.80±13.21a	377.36±13.30b	81.01±14.96b	304.96±2.91ab	325.65±14.81a	29.31±4.14b	JM	378.21±3.14a	88.18±5.44a	294.37±13.08a	415.95±1.46a	145.78±11.41a	308.87±14.53a	339.69±13.44a	43.66±4.41a	
	JM	348.81±9.55b	46.65±1.53b	291.62±7.17a	345.25±6.74c	64.31±1.97b	291.09±10.72b	298.85±3.54a	11.00±1.00c	BM	378.78±5.05a	88.98±7.13a	307.01±13.70a	350.76±2.75b	34.65±3.29b	293.53±12.73a	286.82±9.90a	11.49±4.52a	
	DM	372.25±12.17a	79.76±17.19a	293.44±4.58a	409.80±10.35a	134.67±12.41a	307.36±7.75a	307.50±3.97a	5.03±0.89a	JM	340.97±7.26b	35.58±10.26b	286.88±14.41a	338.49±8.62c	42.68±0.34b	292.24±8.82a	296.68±15.56a	21.59±6.99a	
F	T	9.92**	9.92**	0.24	28.67**	31.97**	4.44	4.56	43.05**	M	88.74**	88.74**	5.72*	218.33**	317.18**	5.64*	2.40	0.42	
	T×M	0.92	0.92	0.08	2.19	5.70**	0.85	0.37	1.99										

注: T 为耕作深度; M 为覆盖材料; T×M 为耕作深度与覆盖材料的交互作用; \*和\*\*分别表示差异达显著(p<0.05)和极显著(p<0.01)水平。下同。

土壤蓄水效率平水年最高,丰水年次之,枯水年最低;处理间丰水年以深松耕30 cm覆塑料地膜处理较高,而平水年和枯水年以深松耕40 cm覆燕麦秸秆处理最高(表1)。同一覆盖材料下,丰水年以 $S_{30}$ 处理最高,较 $P_{15}$ 处理显著提高29.90%,平水年和枯水年均以 $S_{40}$ 处理最高,平均较 $P_{15}$ 处理显著提高53.08%;3种覆盖材料下,丰水年以DM处理最高,较BM处理显著提高1.34倍,平水年和枯水年均以JM处理最高,平均较BM处理显著提高1.25倍;耕作与覆盖交互,丰水年以 $S_{30} \times DM$ 处理最高,较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高2.77倍,平水和枯水年均以 $S_{40} \times JM$ 处理最高,平均较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高2.14倍。

2.1.2 马铃薯生育期土壤水分 克里格插值图(图2)的等值线分布可直观展现各处理下土壤水分时空变异动态特征。在马铃薯生育期各处理土壤含水量均出现“先降后升”的变化规律,而土壤含水量高低与土层深度呈负相关关系。丰水年, $S_{30} \times JM$ 处理在90~120 d对耕层(0~40 cm)保水效果最佳;平水年和枯水年, $S_{40} \times JM$ 处理在各关键时期对0~100 cm土层整体含水量提升最明显。

播后0~60 d,同一耕作深度下,丰水年以DM处理0~20、60~80 cm层土壤含水量最高,平均较BM处理提高17.49%;平水年和枯水年以JM处理0~20、40~60、80~100 cm层最高,平均较BM处理提高15.95%;同一覆盖材料下,丰水年以 $S_{30}$ 处理0~80 cm层土壤含水量最高;平水年以(0 d) $S_{40}$ 处理0~100 cm层和(30~60 d) $S_{30}$ 处理40~80 cm层最佳;枯水年 $S_{40}$ 处理40~60 cm层最佳,可能由于丰水年土壤水分含量过高,而平水年和枯水年水分亏缺,抵消耕作深度的调控差异。耕作与覆盖交互,丰水年(0 d)以 $S_{30} \times DM$ 处理平均0~100 cm层最佳、(30 d)以 $P_{15} \times DM$ 处理20~100 cm层最佳、(60 d)以 $S_{30} \times JM$ 处理60~100 cm层最高,分别较 $P_{15} \times BM$ 显著增加16.88%、21.38%、19.26%;平水年以 $S_{40} \times JM$ 处理20~40 cm最佳,平均较 $P_{15} \times BM$ 显著增加34.94%;枯水年以 $S_{40} \times JM$ 处理40~60 cm层最佳,较 $P_{15} \times BM$ 显著增加28.26%。播后90~150 d,同一耕作深度下,丰水年和平水年以JM处理0~20 cm层土壤含水量最高,枯水年以JM处理0~100 cm层最高,分别较BM处理显著提高9.23%、6.74%和12.56%;同一覆盖材料下,丰水年以 $S_{30}$ 处理0~100 cm层土壤含水量最高,较 $P_{15}$ 处理提高5.13%;平水年以 $S_{30}$ 处理平均0~100 cm层土壤含水量最高,枯水年以 $S_{40}$ 处理20~40 cm层最高,各差异不显著,可能由于作物进入生育后期需水量大且根系吸水能力强,各处理根区土壤水分被大量消耗,含水量整体处于较低水平,弱化耕作与覆盖

措施的调控差异。耕作与覆盖交互,丰水年(90~120 d)以 $S_{30} \times JM$ 处理0~40 cm层和(150 d) $S_{40} \times JM$ 处理平均0~100 cm层最高,分别较 $P_{15} \times BM$ 显著增加22.81%和9.41%;平水年(90、150 d)以 $S_{40} \times JM$ 处理0~40 cm层最高,(120 d)以 $S_{30} \times DM$ 处理平均0~100 cm层最佳,分别较 $P_{15} \times BM$ 显著增加22.31%和18.99%;枯水年(90、150 d)以 $S_{40} \times JM$ 处理60~100 cm层最佳,(120 d)以 $S_{30} \times JM$ 处理60~100 cm层最高,分别较 $P_{15} \times BM$ 显著增加26.63%和34.75%。

## 2.2 水分利用效率

2.2.1 降水利用效率 由表2可知,3 a研究期间,生育期降水利用效率( $PUE_2$ )随休闲期降水量的增加而增加。耕作深度、覆盖材料及二者交互均对3 a生育期降水利用效率影响显著。3 a均以JM处理提高生育期降水利用效率效果最佳,平均较BM处理显著提高52.26%,同一覆盖材料下,丰水年 $S_{30}$ 处理生育期降水利用效率较 $P_{15}$ 处理显著提高18.04%,平水和枯水年以 $S_{40}$ 处理更佳,平均较 $P_{15}$ 处理显著提高24.66%;耕作与覆盖交互,丰水年以 $S_{30} \times JM$ 处理最佳,较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高84.58%,平水和枯水年以 $S_{40} \times JM$ 处理最高,平均较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高89.95%。年降水利用效率( $PUE_1$ )随生育期降雨量增加而增加。覆盖材料均以JM处理年降水利用效率最佳,耕作深度在丰水年以 $S_{30}$ 处理效果显著,较 $P_{15}$ 处理显著提高18.04%,平水和枯水年以 $S_{40}$ 处理更佳,平均较 $P_{15}$ 处理显著提高24.66%;耕作与覆盖交互,丰水年以 $S_{30} \times JM$ 处理最佳,较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高84.58%,平水年和枯水年以 $S_{40} \times JM$ 处理最高,平均较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高89.95%。可见,丰水年以深松耕30 cm覆燕麦秸秆、平水和枯水年均以深松耕40 cm覆燕麦秸秆对提高降水利用效率效果显著。

2.2.2 作物水分利用效率 由图3可知,3 a试验期,作物水分利用效率以平水年最高,丰水年次之,枯水年最低,而耕作深度和覆盖材料对作物水分利用效率的影响均达到极显著水平。耕作与覆盖的交互作用对作物水分利用效率的影响因降水年型而异,在平水年显著,丰水年和枯水年无显著影响。同一覆盖材料下,丰水年中 $S_{30}$ 处理作物水分利用效率最高;平水与枯水年里, $S_{40}$ 处理更好;同一耕作深度下,均以JM处理较优。耕作与覆盖交互,丰水年以 $S_{30} \times JM$ 处理作物水分利用效率最高,较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高71.02%,平水年 $S_{40} \times JM$ 处理较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高51.99%,枯水年 $S_{40} \times JM$ 处理较 $P_{15} \times BM$ 处理显著提高111.00%。可见,丰水年以深松耕30 cm覆燕麦秸秆处理作物水分利用效率效果最佳,平水和枯水年以深松耕40 cm覆燕麦秸秆处理最佳。

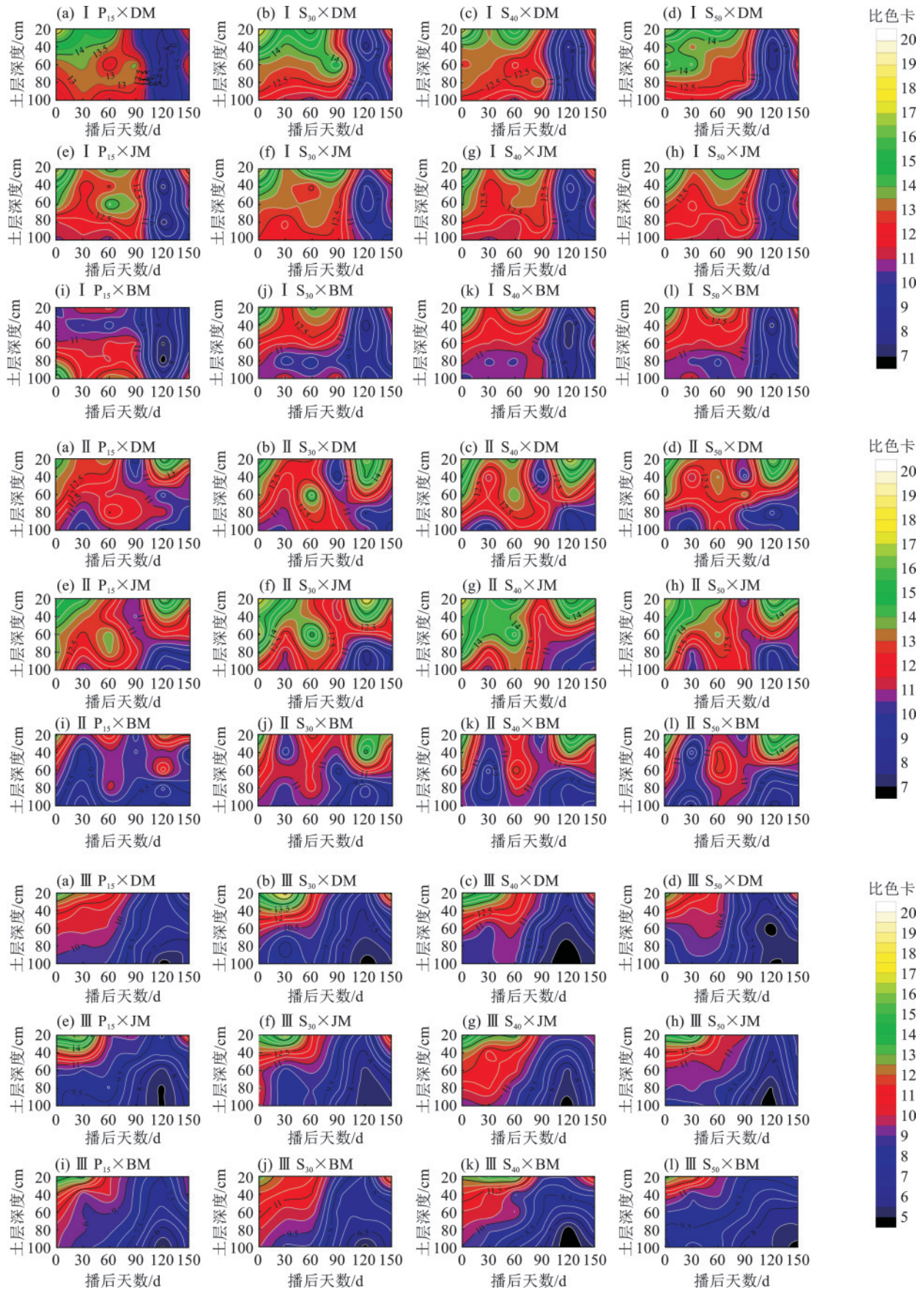
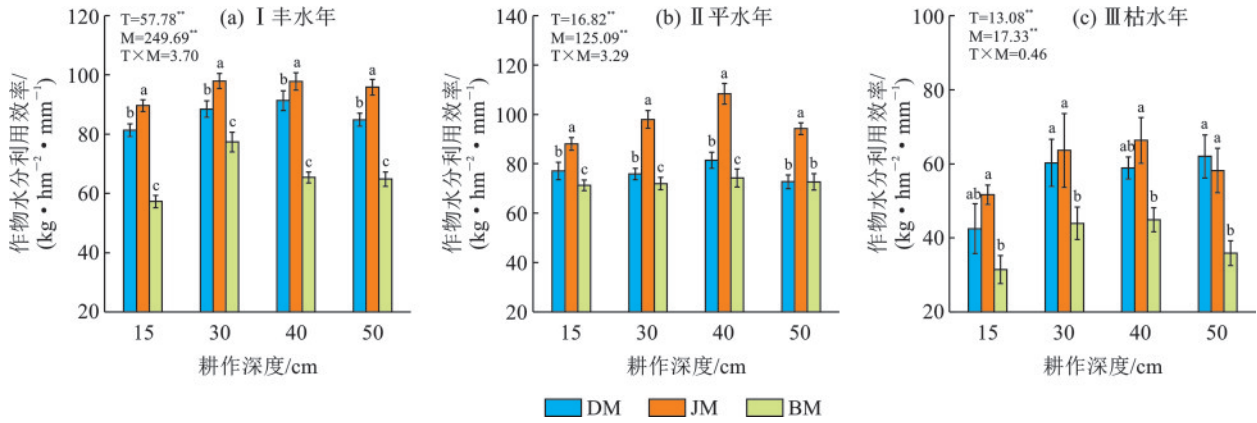


图 2 耕作覆盖下马铃薯生育期土壤含水量垂直变化特征

Fig.2 Vertical variation characteristics of soil water content under tillage with mulching during potato growing season

表 2 不同耕作覆盖模式对降水利用效率的影响  
Table 2 Effects of different tillage with mulching treatments on precipitation use efficiency

耕作深度	覆盖材料	丰水年						平水年						枯水年	
		休闲期 降水量 ( $P_b$ )/ mm	生育期 降水量 ( $P_a$ )/ mm	生育期降水 利用效率 ( $PUE_2$ )/(kg· $hm^{-2}$ ·mm $^{-1}$ )	年降水 利用效率 ( $PUE_1$ )/(kg· $hm^{-2}$ ·mm $^{-1}$ )	休闲期 降水量 ( $P_b$ )/ mm	生育期 降水量 ( $P_a$ )/ mm	生育期降水 利用效率 ( $PUE_2$ )/(kg· $hm^{-2}$ ·mm $^{-1}$ )	年降水 利用效率 ( $PUE_1$ )/(kg· $hm^{-2}$ ·mm $^{-1}$ )	休闲期 降水量 ( $P_b$ )/ mm	生育期 降水量 ( $P_a$ )/ mm	生育期降水 利用效率 ( $PUE_2$ )/(kg· $hm^{-2}$ ·mm $^{-1}$ )	年降水 利用效率 ( $PUE_1$ )/(kg· $hm^{-2}$ ·mm $^{-1}$ )	生育期降水 利用效率 ( $PUE_2$ )/(kg· $hm^{-2}$ ·mm $^{-1}$ )	年降水 利用效率 ( $PUE_1$ )/(kg· $hm^{-2}$ ·mm $^{-1}$ )
P <sub>15</sub>	DM			88.62±3.39b	76.59±2.93b	94.69±7.82b	73.70±6.09b	59.62±5.69a				46.42±4.43a			
	JM	70.8	450.5	98.32±2.59a	84.96±2.24a	83.4	292.8	116.38±6.76a	90.58±5.26a	65.2	229.3	62.74±7.06a	48.85±5.50a		
	BM			59.48±2.63c	51.40±2.27c	83.39±1.59c	64.90±1.24c	42.50±4.74b				33.09±3.69b			
S <sub>30</sub>	DM			98.69±2.24b	85.29±1.93b	292.8	292.8	96.36±12.91b	75.00±10.05b			77.09±9.34a	60.03±7.27a		
	JM	70.8	450.5	109.79±2.77a	94.88±2.39a	83.4	292.8	136.66±10.79a	106.36±8.40a	65.2	229.3	82.04±8.22a	63.87±6.40a		
	BM			82.40±2.20c	71.21±1.90c	292.8	292.8	85.17±2.89c	66.29±2.25c			57.19±4.98b	44.53±3.87b		
S <sub>40</sub>	DM			99.10±1.98b	85.64±1.71b	292.8	292.8	104.26±4.99b	81.14±3.88b			80.26±9.03b	62.49±7.03b		
	JM	70.8	450.5	108.88±2.20a	94.1±1.90a	83.4	292.8	151.48±8.20a	117.9±6.38a	65.2	229.3	87.65±9.30a	68.25±7.24a		
	BM			68.97±4.17c	59.60±3.60c	292.8	292.8	90.34±6.63c	70.31±5.16c			58.62±12.68c	45.64±9.87c		
S <sub>50</sub>	DM			92.25±2.83b	79.72±2.45b	89.36±8.43b	69.55±6.56b	78.49±3.86a	61.11±3.00b						
	JM	70.8	450.5	105.66±4.59a	91.31±3.97a	83.4	292.8	130.43±5.64a	101.51±4.39a	65.2	229.3	71.84±8.73b	55.94±6.80a		
	BM			67.90±1.20c	58.68±1.04c	86.50±4.82b	67.32±3.75b	46.22±8.04c	35.98±6.26c						
T			121.64**	121.28**	4.82*	4.82*	38.03**	38.07**							
F			566.35**	566.57**	181.56**	181.59**	137.72**	137.81**							
T×M			5.31**	5.32**	3.47*	4.45*	2.86*	2.86*							



注:\*\*表示  $p < 0.01$ 。

图 3 耕作覆盖模式下作物水分利用效率

Fig.3 Crop water use efficiency under tillage with mulching treatments

### 2.3 不同降水年型下耕作深度与水分利用效率的效应函数

由图 4 可知,对不同降水年型下耕作深度与水分利用效率关系进行曲线拟合发现,作物水分利用效率和降水利用效率均随耕作深度呈先上升后下降趋势,平水年最高,丰水年和枯水年次之。丰水年,作物水分利用效率与耕作深度拟合方程为:  $y_1 = -0.027x^2 + 1.878x + 54.243, R^2 = 0.929$ ,当耕作深度为 30~35 cm 时,作物水分利用效率最高,为 87.19~97.94 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ );平水年,拟合方程为:  $y_2 = -0.018x^2 + 1.341x + 61.005, R^2 = 0.831$ ,当耕作深度为 35~40 cm 时,作物水分利用效率最高,为 85.57~108.31 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ );枯水年,拟合方程为:  $y_3 = -0.317x^2 + 2.343x + 13.911, R^2 = 0.997$ ,当耕作深度为 35~40 cm 时,作物水分利用效率最高,为 57.26~66.32 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ )。丰水年,年降水利用效率与耕作深度拟合方程为:  $y_1 = -0.029x^2 + 2.027x + 47.554, R^2 = 0.908$ ,当耕作深度

为 30~35 cm 时,年降水利用效率最高,为 82.69~94.88 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ );平水年,拟合方程为:  $y_2 = -0.026x^2 + 1.856x + 53.731, R^2 = 0.720$ ,当耕作深度为 35~40 cm 时,年降水利用效率最高,为 86.51~117.9 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ );枯水年,拟合方程为:  $y_3 = -0.036x^2 + 2.560x + 12.183, R^2 = 0.986$ ,当耕作深度为 35~40 cm 时,年降水利用效率最高,为 58.31~68.25 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ )。丰水年、平水年和枯水年生育期降水利用效率与耕作深度拟合方程分别为:  $y_1 = -0.034x^2 + 2.346x + 55.028 (R^2 = 0.908)$ 、 $y_2 = -0.034x^2 + 2.385x + 69.036 (R^2 = 0.720)$ 、 $y_3 = -0.047x^2 + 3.367x + 16.025 (R^2 = 0.986)$ ,当耕作深度分别为 30~35、35~40、35~40 cm 时,生育期降水利用效率最高,分别为 95.69~109.79、111.15~151.48、76.69~89.77 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{mm}$ )。可见,丰水年耕作深度在 30~35 cm 时,作物水分利用效率和降水利用效率较高,而平水年和枯水年耕作深度在 35~40 cm 时较高。

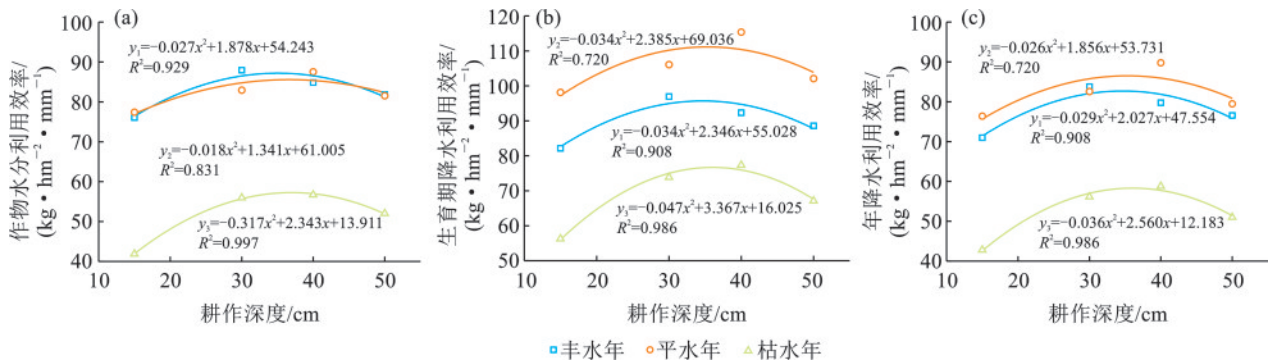


图 4 不同降水年型下耕作深度与水分利用效率的响应关系

Fig.4 Relationship between tillage depth and water use efficiency under different precipitation year types

## 3 讨论

### 3.1 耕作覆盖对土壤水分的影响

土壤水分变化主要受耕作、覆盖及降水分布的影响。杨清山等<sup>[22]</sup>研究表明,休闲期深松能蓄水保

墒,提高播种期 0~300 cm 层土壤蓄水量,较传统耕作提高蓄水效率 18%~24%;任爱霞等<sup>[23]</sup>研究表明,休闲期深松土壤水分得到恢复,可提高 0~300 cm 层土壤蓄水量 24~90 mm,蓄水效率提高 20%~86%;

高艳梅等<sup>[12]</sup>研究发现,休闲期采用覆盖处理可提高播种期 0~300 cm 层土壤蓄水能力,在丰水、平水和枯水年分别为 40~41、55~58、70 mm。此外,枯水年更有利于深层土壤水分的积累,且显著提高不同降水年型下休闲期土壤蓄水效率,丰水年提高 20%,平水年提高 51%~54%,枯水年提高 175%~185%。本研究表明,休闲初期,以覆盖塑料地膜蓄水效果较好,而休闲末期覆盖秸秆蓄水最佳。丰水年,深松耕 30 cm 覆塑料地膜处理休闲期土壤蓄水量和蓄水效率效果最佳,平水和枯水年以深松耕 40 cm 覆燕麦秸秆最佳,土壤蓄水量和蓄水效率分别较翻耕不覆盖显著提高 16.88%~24.64% 和 2.14~2.77 倍。分析原因:1)深松能打破犁底层,使土壤孔隙度增加,改善土壤通透性,降水时,使更多水分快速下渗到深层土壤,增加土壤的蓄水量,为作物生长提供更充足的水分储备<sup>[2]</sup>,同时土壤水分高低还与休闲期降水量的多寡有关<sup>[14]</sup>。2)在休闲初期,覆盖塑料地膜具有良好的不透水性,能有效减少土壤水分的蒸发,阻止水汽散发到空气中,让土壤保存更多的水分<sup>[24]</sup>。3)土壤经过休闲期,覆盖在土壤表面的秸秆可增加土壤有机质,优化土壤耕层构造,提升土壤对水分的渗透性能,且秸秆间有缝隙,降水时能够让雨水更好地渗入土壤,蓄水保墒,防止土壤表面被雨水冲击而板结<sup>[25-26]</sup>。

有研究<sup>[27]</sup>表明,播后 0~60 d 深松 30~35 cm 覆燕麦秸秆对深层 60~100 cm 层土壤保水效果较好,播后 60~120 d 深松覆盖秸秆处理分别对枯水年和平水年 0~60、140~200 cm 层土壤含水量最高。耕作结合覆盖能有效改善马铃薯生育期 0~200 cm 层土壤水分状况,深松覆地膜对播后 0~60 d 土壤水分保蓄效果较好,深松覆秸秆对 60~150 d 土壤水分状况的改善效果最佳<sup>[15]</sup>。本研究表明,同一耕作深度不同降水年型以覆燕麦秸秆或塑料地膜处理土壤含水量较高,同一覆盖材料下以深松 30、40 cm 较佳,耕作与覆盖交互以深松 30~40 cm 覆燕麦秸秆或者塑料地膜可提高 0~100 cm 层土壤含水量。究其原因:1)与不同生育阶段降水量和耕作措施有关。丰水年降水充足时,深松 30 cm 可打破犁底层,并形成连续孔隙,加速降雨入渗、减少径流,保障水分下渗,同时可避免耕作过深致使耕层稳定性破坏、养分淋溶加剧、作物根系“悬空”及能耗成本陡增等弊端;结合地膜覆盖可增强抑蒸锁水,可实现“促渗+保墒”协同,且与深松 40 cm 相比更能降低农机能耗及人工成本等,同时避免水分无效下渗,提升水肥吸收效率,结合覆膜可使土壤水分显著提升,产投比表现最优<sup>[28-29]</sup>。2)平水/枯水年降水少且不均,需依赖深层储水,深松 40

cm 可构建深层连续孔隙、形成“土壤水库”,降低深层土壤体积质量以提升持水能力,与深松 30 cm 相比更利于调用深层水分;燕麦秸秆覆盖可通过反射、辐射降低土壤温度,秸秆腐解后通过改善土壤结构进而增强其持水能力,也可避免地膜在干早期易导致根系缺氧、植株早衰等问题;深松 40 cm 结合秸秆覆盖可形成稳定的耕层孔隙网络,在少雨年份实现对降水的二次分配,将有限降水最大化储存于根层<sup>[30-31]</sup>。

### 3.2 耕作覆盖对水分利用效率的影响

不同降水年型下深翻或深松可提高降水利用效率,丰水年,以深松 30~40 cm 最佳,平水年和枯水年以深翻 25~30 cm 效果较好<sup>[10]</sup>。有研究<sup>[19]</sup>表明,枯水年,深松-免耕-深松平均生育期和年降水利用效率分别较传统耕作提高 9.93% 和 9.96%,在平水年较为显著。也有研究<sup>[32]</sup>发现,平水年和欠水年生育期和年降水利用效率均以覆盖地膜最高,相对欠水年以覆秸秆效果最佳。本研究表明,耕作深度、覆盖材料均对不同降水年型下降水利用效率和水分利用效率有显著影响;二者交互对丰水年、平水年和枯水年降水利用效率影响显著。丰水年生育期和年降水利用效率以深松耕 30 cm 覆燕麦秸秆处理最高,平水和枯水年以深松耕 40 cm 覆燕麦秸秆最佳。分析原因:1)平水年 8 月降雨量的增加,耕作覆盖可显著促进水分利用效率提高。2)深松耕 30~40 cm 覆燕麦秸秆可增加降水入渗,减少蒸发,增加土壤保水性,促进作物根系对土壤水分的吸收和利用,从而提高水分利用效率<sup>[3]</sup>。

已有研究<sup>[16]</sup>表明,作物水分利用效率随降水和干旱指数的变化有较大的年际差异,但与常规处理相比,塑料地膜与秸秆覆盖可显著提高小麦水分利用效率。不同降水年型深旋耕 45 cm 处理的冬小麦水分利用效率较传统浅耕 15 cm 处理显著提高 19.0%<sup>[33]</sup>;覆盖秸秆下小麦的土壤含水量增加 23%,而水分利用效率提高 33%<sup>[34]</sup>。本研究表明,丰水年以深松耕 30 cm 覆燕麦秸秆处理作物水分利用效率最高,平水和枯水年均以深松耕 40 cm 覆燕麦秸秆处理最高,均较翻耕 15 cm 不覆盖显著增加,与前人<sup>[33-34]</sup>研究结果相似。究其原因:深松可以改善土壤结构,提高作物水分利用效率,而适宜的耕作深度更有利于不同降水年型下作物水分利用效率的提高<sup>[35-37]</sup>;同时,秸秆覆盖可蓄积土壤中的水分,进而促进作物生育期对土壤水分的利用<sup>[15]</sup>。

### 3.3 耕作覆盖与水分利用的响应特征

本研究表明,粉垄耕作越深,越有利于降雨入渗和土壤水分调节,覆盖塑料薄膜后,能克服土壤水分流失的缺点,减少耗水量,进一步提高调节土壤储水

能力及水分利用效率。耕作深度越深,水分利用效率的改善程度就越高<sup>[38]</sup>。ZHOU等<sup>[39]</sup>研究发现,在地膜覆盖与无覆盖处理相比,地膜覆盖对表层土壤水分的保蓄效果极为突出,显著提升水分利用效率。还有研究<sup>[40]</sup>发现,深松30 cm能够打破犁底层,有利于水分储存,提高水分利用效率。通过对耕作深度与水分利用效率关系拟合发现,丰水年,耕作深度在30~35 cm,作物水分利用效率和降水利用效率最高,而平水年和枯水年耕作深度在35~40 cm最高。分析其原因:1)深松耕作与覆盖措施协同运用,能够有效调控土壤水分变化,为马铃薯生长发育提供良好土壤微环境条件<sup>[41]</sup>;2)耕作结合覆盖模式可通过调控土壤水分利用过程,进而提高作物水分利用效率<sup>[3]</sup>。未来研究可结合叶片光合生理和根际微生物组学,进一步揭示耕作覆盖措施如何通过影响根系活性和微生物功能,最终驱动水分利用效率的提升机制。

#### 4 结论

1)不同降水年型下耕作覆盖可提高休闲期土壤蓄水量和蓄水效率,丰水年,深松耕30 cm覆塑料地膜较好,而平水和枯水年以深松耕40 cm覆燕麦秸秆最佳。不同降水年型下耕作覆盖可显著提高0~100 cm层土壤含水量,覆盖材料以覆燕麦秸秆或塑料地膜处理表现较好,耕作深度以深松耕30、40 cm较佳;二者交互作用下,以深松耕30~40 cm覆盖秸秆或塑料地膜对0~100 cm层土壤含水量效果最佳。

2)耕作、覆盖对水分利用效率有显著影响,二者交互对丰水和平水年影响显著,而对枯水年无显著影响。丰水年作物水分利用效率和降水利用效率均以深松耕30 cm覆燕麦秸秆最高,而平水年和枯水年以深松耕40 cm覆燕麦秸秆最高。通过对耕作深度与水分利用效率关系拟合发现,丰水年耕作深度在30~35 cm,作物水分利用效率和降水利用效率较高,而平水年和枯水年耕作深度在35~40 cm较高。

综上,建议在宁南旱作区马铃薯生产中,丰水年采用深松耕30~35 cm覆燕麦秸秆处理,平水年和枯水年采用深松耕35~40 cm覆燕麦秸秆处理对水分利用效率提高最显著。

#### 参考文献:

- [1] 马力文,刘静,徐青,等.宁夏中南部地区马铃薯水分盈亏研究[J].农学学报,2023,13(8):25-31.  
MA L W, LIU J, XU Q, et al. Study on the water surplus and deficiency of potato in the central and southern Ningxia[J].Journal of Agriculture,2023,13(8):25-31.
- [2] 侯贤清,牛有文,吴文利,等.不同降雨年型下种植密度对旱作马铃薯生长、水分利用效率及产量的影响[J].作

物学报,2018,44(10):1560-1569.

HOU X Q, NIU Y W, WU W L, et al. Effect of planting density on the growth, water use efficiency and yield of dry-farming potato under different rainfall year types [J].Acta Agronomica Sinica,2018,44(10):1560-1569.

- [3] 韩固,苗芳芳,王楠,等.宁南旱区耕作覆盖对马铃薯产量及土壤水热特征的影响[J].应用生态学报,2022,33(12):3352-3362.  
HAN G, MIAO F F, WANG N, et al. Effects of tillage with mulching on potato yield and the characteristics of soil water and temperature in arid area of southern Ningxia[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2022,33(12):3352-3362.
- [4] ZHANG Y J, WANG S L, WANG H, et al. The effects of rotating conservation tillage with conventional tillage on soil properties and grain yields in winter wheat-spring maize rotations[J].Agricultural and Forest Meteorology,2018,263:107-117.
- [5] 韩成龙.半干旱黄土区不同降雨年型地膜覆盖对春小麦产量形成及磷素分配的影响[D].兰州:兰州大学,2014.  
HAN C L. Effects of plastic film mulching in different rainfall years on yield formation and phosphorus distribution of spring wheat in semi-arid loess region [D].Lanzhou: Lanzhou University,2014.
- [6] 侯贤清,李荣.秋耕覆盖对土壤水热肥与马铃薯生长的影响分析[J].农业机械学报,2020,51(12):262-275.  
HOU X Q, LI R. Effects of autumn tillage with mulching on soil water, temperature and nutrient and potato growth[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):262-275.
- [7] 苗芳芳,勉有明,普雪可,等.耕作覆盖对宁南旱区土壤团粒结构及马铃薯水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2021,54(11):2366-2376.  
MIAO F F, MIAN Y M, PU X K, et al. Effects of tillage with mulching on soil aggregate structure and water use efficiency of potato in dry-farming area of southern Ningxia [J].Scientia Agricultura Sinica,2021,54(11):2366-2376.
- [8] 张凯,刘战东,强小嫫,等.深松处理对豫北农田土壤水分与作物耗水的影响[J].农业机械学报,2019,50(10):251-258.  
ZHANG K, LIU Z D, QIANG X M, et al. Effects of subsoiling on soil moisture and crop water consumption in farmland of northern Henan Province [J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):251-258.
- [9] 张绪成,马一凡,于显枫,等.西北半干旱区深旋松耕作对马铃薯水分利用和产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(10):3293-3301.  
ZHANG X C, MA Y F, YU X F, et al. Effects of vertically rotary sub-soiling tillage on water utilization and yield of potato in semi-arid area of northwest China[J].Chinese

- Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3293-3301.
- [10] 孙敏, 温斐斐, 高志强, 等. 不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1459-1469.  
SUN M, WEN F F, GAO Z Q, et al. Effects of farming practice during fallow period on soil water storage and yield of dryland wheat in different rainfall years [J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1459-1469.
- [11] 谢成俊, 王平, 陈娟. 不同覆盖方式对农田土壤水热状况及马铃薯产量的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(5): 1151-1158.  
XIE C J, WANG P, CHEN J. Effects of different mulching patterns on soil moisture, temperature, and potato yield [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5): 1151-1158.
- [12] 高艳梅, 孙敏, 高志强, 等. 不同降水年型旱地小麦覆盖对产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3589-3599.  
GAO Y M, SUN M, GAO Z Q, et al. Effects of mulching on grain yield and water use efficiency of dryland wheat in different rainfall years [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18): 3589-3599.
- [13] SONG J J, ZHANG D D, WANG C Y, et al. Enhancing soybean yield stability and soil health through long-term mulching strategies: Insights from a 13-year study [J]. European Journal of Agronomy, 2024, 161: e127383.
- [14] HOU X Q, LI R. Potato tuber yields in semi-arid environments are increased by tillage and mulching practices [J]. Agronomy Journal, 2018, 110(6): 2641-2651.
- [15] 李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 115-123.  
LI R, HOU X Q. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 115-123.
- [16] 殷文, 陈桂平, 柴强, 等. 前茬小麦秸秆处理方式对河西走廊地膜覆盖玉米农田土壤水热特性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(15): 2898-2908.  
YIN W, CHEN G P, CHAI Q, et al. Responses of soil water and temperature to previous wheat straw treatments in plastic film mulching maize field at Hexi corridor [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(15): 2898-2908.
- [17] 李丹, 王翻龙, 张龙, 等. 不同降水年型下耕作结合秸秆覆盖对马铃薯耗水特征及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 275-286.  
LI D, WANG F L, ZHANG L, et al. Effect of tillage combined with straw mulching on water consumption characteristics and yield of potato under different precipitation years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 275-286.
- [18] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1234-1240.  
ZHANG B Y, XU X X, LIU W Z, et al. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1234-1240.
- [19] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 等. 夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 94-100.  
HOU X Q, LI R, HAN Q F, et al. Effects of different tillage patterns during summer fallow on soil water conservation and crop water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 94-100.
- [20] CHEN Y L, LIU T, TIAN X H, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau [J]. Field Crops Research, 2015, 172: 53-58.
- [21] WANG S L, WANG H, ZHANG Y H, et al. The influence of rotational tillage on soil water storage, water use efficiency and maize yield in semi-arid areas under varied rainfall conditions [J]. Agricultural Water Management, 2018, 203: 376-384.
- [22] 杨清山, 孙敏, 高志强, 等. 黄土高原休闲期深松后覆盖播种对旱地小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 158-166.  
YANG Q S, SUN M, GAO Z Q, et al. Effect of sowing-mulching following subsoiling in fallow period on wheat yield in arid area on the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2): 158-166.
- [23] 任爱霞, 孙敏, 王培如, 等. 深松蓄水和施磷对旱地小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3678-3689.  
REN A X, SUN M, WANG P R, et al. Effects of subsoiling in fallow period and phosphorus fertilizer on yield and water use efficiency in dry-land wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(19): 3678-3689.
- [24] 胡兵辉, 王维, 张红芳, 等. 西南高原“旱三熟”地区不同覆盖栽培措施的土壤水分效应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 183-188.  
HU B H, WANG W, ZHANG H F, et al. The soil water effects of different mulching cultivation patterns in triple cropping dry-land on southwest plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 183-188.
- [25] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 429-436.  
LIU Y Q, WANG J L, LI Z Z. Research process on the effects of straw mulch on soil moisture and soil erosion [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 429-436.

- [26] 甘磊,张俊,郑思文,等. 秸秆覆盖对广西甘蔗地土壤水分与结构变化的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(7): 1745-1752.  
GAN L, ZHANG J, ZHENG S W, et al. Effects of straw mulching on the change of soil moisture and structure in sugarcane field in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(7): 1745-1752.
- [27] 韩固,苗芳芳,王楠,等. 深松覆盖模式对宁南地区雨养马铃薯水分利用效率的影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(11): 905-917.  
HAN G, MIAO F F, WANG N, et al. Effects of subsoiling with mulching pattern on water use efficiency of potato in rainfed region of southern Ningxia[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(11): 905-917.
- [28] 程思贤,刘卫玲,靳英杰,等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1355-1365.  
CHENG S X, LIU W L, JIN Y J, et al. Effects of subsoiling depth on topsoil properties, crop yield and water use efficiency in lime concretion black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1355-1365.
- [29] 赵亚丽,刘卫玲,程思贤,等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2489-2503.  
ZHAO Y L, LIU W L, CHENG S X, et al. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(13): 2489-2503.
- [30] 党廷辉,郭栋,戚龙海. 旱地地膜和秸秆二元覆盖栽培下小麦产量与水分效应[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 20-24.  
DANG T H, GUO D, QI L H. Effects of wheat yield and water use under dual-mulching mode of plastic film and straw in the dryland farming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 20-24.
- [31] 殷涛,何文清,严昌荣,等. 地膜秸秆双覆盖对免耕种植玉米田土壤水热效应的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 78-87.  
YIN T, HE W Q, YAN C R, et al. Effects of plastic mulching on surface of no-till straw mulching on soil water and temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 78-87.
- [32] 韩固,侯贤清,段瑞兵,等. 免耕覆盖提升土壤水分利用和马铃薯产量的协同效应[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 120-129.  
HAN G, HOU X Q, DUAN R B, et al. Synergistic effects of no-tillage combined with mulching on improving soil moisture use and potato yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 120-129.
- [33] WU F, ZHAI L C, XU P, et al. Effects of deep vertical rotary tillage on the grain yield and resource use efficiency of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(2): 593-605.
- [34] ADIL M, ZHANG C, YAO Z J, et al. Interactive effects of intercropping and mulching under conservation tillage as sustainable agriculture increased cotton productivity[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10(10): e1092636.
- [35] 郑侃,何进,李洪文,等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的Meta分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7-15.  
ZHENG K, HE J, LI H W, et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 7-15.
- [36] PIAO L, LI M, XIAO J L, et al. Effects of soil tillage and canopy optimization on grain yield, root growth, and water use efficiency of rainfed maize in northeast China[J]. Agronomy, 2019, 9(6): e336.
- [37] 李荣,鄢慧芳,张龙,等. 不同耕作措施对宁南地区土壤物理性质及作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(18): 3543-3555.  
LI R, YAN H F, ZHANG L, et al. Effects of different tillage practices on soil physical properties and crop yield in the region of southern Ningxia[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(18): 3543-3555.
- [38] 李轶冰,逢焕成,杨雪,等. 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7478-7486.  
LI Y B, PANG H C, YANG X, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-Huai-Hai region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7478-7486.
- [39] ZHOU L M, LI F M, JIN S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41-47.
- [40] 勉有明. 耕作覆盖对旱地土壤环境和马铃薯生理生态及产量的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.  
MIAN Y M. Effects of tillage with mulching on dryland soil environment, ecophysiology and yield of potato[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- [41] 普雪可,吴春花,勉有明,等. 不同覆盖方式对旱作马铃薯生长及土壤水热特征的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(4): 734-747.  
PU X K, WU C H, MIAN Y M, et al. Effects of different mulching patterns on growth of potato and characteristics of soil water and temperature in dry farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(4): 734-747.